

Синтез та дослідження системи керування процесом формування вуглецевих виробів

О. А. Жученко, М. Г. Хібеба

Одним з найбільш енергоємних виробництв є виробництво вуглецевих виробів, тому підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-технічною задачею. Одним із шляхів розв'язання поставленої задачі є створення сучасної системи керування виробництвом.

У роботі розглядаються питання створення системи керування одним з визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів – процесом їх формування. В основу роботи системи керування покладений критерій оптимальності на основі питомої собівартості продукції з урахуванням показників її якості. Як метод керування використовується МРС-керування (Model Predictive Control). Результати проведеного дослідження залежності критерія оптимальності від параметрів налаштувань МРС-регулятора дозволили визначити оптимальні значення горизонтів прогнозування та керування, які забезпечують мінімізацію питомої собівартості продукції. Розроблена структура запропонованої системи керування у середовищі Simulink, що дозволяє досліджувати дану систему керування шляхом комп'ютерного моделювання.

Дослідження ефективності запропонованої системи керування процесом формування вуглецевих виробів здійснювалось шляхом порівняння якості керування даної системи та системи, яка використовує класичний ПД-закон керування. З цією метою у середовищі Simulink синтезовано трьохконтурну систему керування на основі ПД-регуляторів. Налаштування кожного з регуляторів проводилось за методом Пауела на мінімальне значення інтегрального критерію. Результати порівняльного дослідження продемонстрували, що на кожному циклі роботи значення критерію оптимальності у системі керування з МРС-регулятором на 8,8 % менше, ніж у системі з ПД-регуляторами при однакових показниках якості продукції. Це говорить про покращення техніко-економічних показників процесу формування. Особливого значення ця обставина набуває з урахуванням циклічності технологічного процесу формування вуглецевих виробів

Ключові слова: виробництво вуглецевих виробів, процес формування, гідравлічний прес, система керування, критерій оптимальності, МРС-керування

1. Вступ

Властивості графітових виробів, зокрема їх висока термостійкість, електропровідність та механічна міцність [1–4] спричинили їх широке застосування у різних галузях промислового виробництва. На сьогоднішній день вони використовуються у сталеплавильних, феросплавних електродугових печах металургійних та машинобудівних підприємств, в якості катодів та анодів для елект-

ролізерів, іншому обладнанні виробництв, пов'язаних з необхідністю використання електротермічних технологічних процесів.

Виробництво вуглеграфітової продукції складається з ряду технологічних процесів та операцій [5–8] і характеризується значною ресурсо- та енергоємністю. Окрім того, існує тенденція до постійного зростання вимог до якісних показників продукції, тому актуальною є задача підвищення ефективності даного виробництва шляхом впровадження оптимальних режимів роботи на ключових етапах виробництва.

Одним з основних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів є процес формування останніх шляхом продавлювання електродної маси через мундштук відповідної форми у гідравлічному пресі. Саме на етапі пресування електродних заготовок закладаються в основному всі спадкові властивості, що визначають якість готових виробів [2, 3]. Зокрема, пресування в значній мірі визначає форму заготовки, її довжину, пористість та механічну міцність.

Весь процес формування можна умовно поділити на наступні етапи: завантаження, підпресування матеріалу та безпосередньо пресування вуглецевих виробів. З точки зору якості готової продукції найбільш відповідальним є етап безпосередньо пресування, тому у подальшому зосередимо увагу саме на цьому етапі процесу формування вуглецевих виробів.

Процес пресування здійснюється в межах мундштука і масного циліндра. Електродна маса, попередньо завантажена і підпресована, під тиском випресовується через формувальну та калібрувальну зону мундштука. При цьому поверхня формувальної та калібрувальної зони підігрівається відповідними індукторами, а краї калібрувальної зони додатково підігріваються свічками (рис. 1).

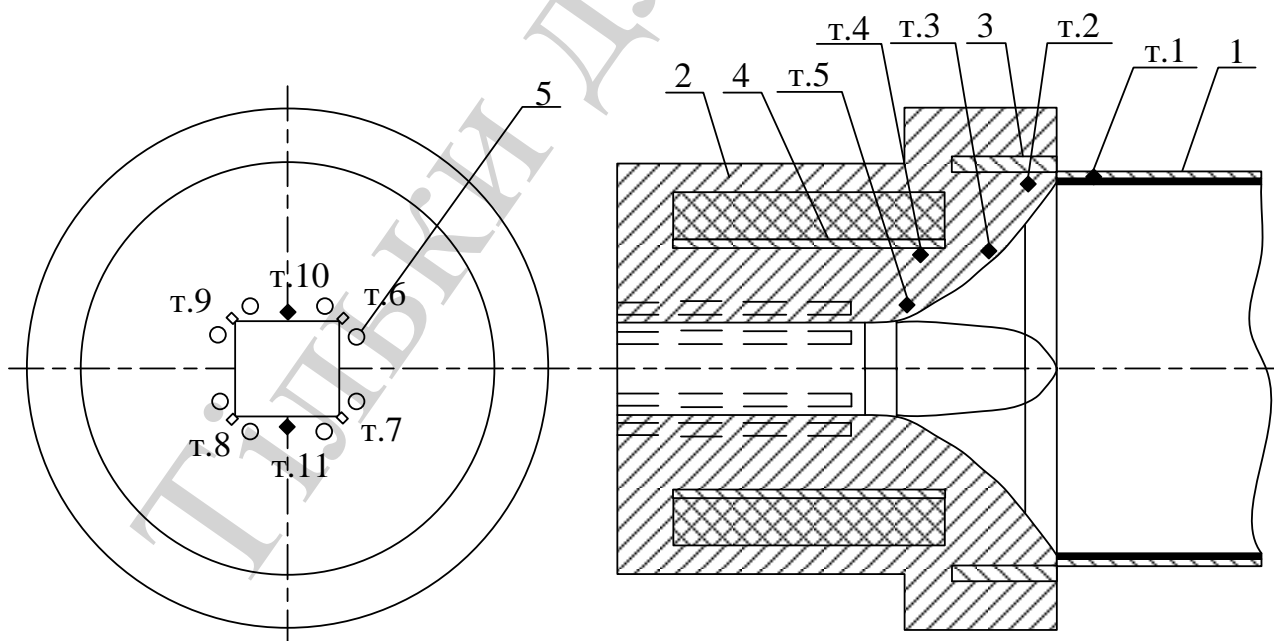


Рис. 1. Промисловий пресовий інструмент для формування великогабаритних вуглецевих заготовок: 1 – масний циліндр з нагрівником; 2 – мундштук; 3, 4 – основні індуктори; 5 – додаткові нагрівники; т. 1–11 – точки вимірювання температури

Виходячи з вищеназваних обставин нагальною є задача створення та дослідження такої системи керування процесом формування вуглецевих виробів, яка забезпечить підвищення техніко-економічної ефективності даної технологічної стадії, а у кінцевому результаті – всього виробництва вуглецевих виробів в цілому.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогоднішній день відомі декілька систем керування процесом пресування вуглецевих виробів.

Автори праці [2] пропонують як контрольований параметр використовувати інтенсивність випресовування (зусилля для видавлювання одиничного об'єму маси за 1 с). Недоліком даного методу є неможливість безпосереднього вимірювання даного параметру, що призводить до непрямого керування ним та, як наслідок, до можливих похибок керування, обумовлених неточністю розрахунків даного показника.

Дослідження впливу різних параметрів на якість випресованих заготовок показали [4], що для отримання бездефектної продукції необхідно, щоб під час пресування були дотримані умови нерозривності середовища. Виконання цих умов може бути досягнуто за допомогою регулювання температур у «контрольних» точках поверхні пресового інструменту [4]. Така система керування в залежності від температур в «контрольних» точках та температури розм'якшення пеку $T_{\text{розм}}$ вмикає або вимикає нагрівальні елементи. Суттєвим недоліком даної системи керування є її релейна природа, що значно погіршує якість керування.

В праці [9] описано алгоритм розробки оптимального керування індуктором пресу з критерієм оптимальності по мінімізації енергозатрат на підігрів поверхні мундштуку. Внаслідок того, що необхідні температури в контрольних точках задані як обмеження в задачі оптимізації, знайдене за цим алгоритмом керування не забезпечує оптимальність технологічних параметрів процесу. А тоді й отримана при такому керуванні продукція буде мати не оптимальні, а допустимі показники якості. До того ж в цій роботі не описано алгоритм вибору обмежень на температури та не враховано вплив швидкості пресування на перебіг технологічного процесу.

Автори [10] представили модель екструзії в'язко-пластичних матеріалів та запропонували систему керування, що враховує зміну реологічних властивостей, які й розраховуються даною моделлю. Однак в роботі представлена лише концепція такої системи керування і відсутня структура та алгоритм розробки даної системи.

В патенті [11] розроблено апарат для екструзії з покращеною системою керування температурою. Практично вся суть покращення полягає в розміщенні датчика температури майже на межі контакту стінка пресу – матеріал, що піддається екструзії. За свідченнями авторів, таке нововведення дозволяє оперативно отримувати інформацію про температуру практично самого матеріалу, що в свою чергу підвищить ефективність системи керування температурою. Але в рамках цієї розробки не представлено доцільність такої модифікації з точки зо-

ру затрат на її введення та не досліджено її вплив на міцність внутрішньої частини пресового інструменту в місці встановлення датчика.

Автори [12] представили супервізорну систему керування процесом екструзії гарячого розплаву. Основна ідея розробленої системи полягає в тому, що керування здійснюється на основі збору та аналізу основних технологічних параметрів процесу. Саме ж керування здійснюється по показникам якості вихідної продукції і реалізовується за допомогою MSPC (multivariate statistical process control) методу. Дана система хоч і забезпечує високі показники якості продукції, але все ж не може бути використана в повній мірі як основа для створення системи керування формуванням вуглецевих виробів так як однією з вимог для застосування даної системи є неперервність процесу, тоді як формування – процес періодичний.

В праці [13] запропоновано систему керування двошнековим екструдером для екструзії порошкоподібних речовин на основі MPC-регулятора (MPC-Model Predictive Control). Розроблена система показала високу ефективність. Тому загальний підхід до синтезу системи керування, продемонстрований в даній праці, може бути використаний з врахуванням особливостей процесу формування вуглецевих виробів.

Автор праць [14, 15] розробляє нейронечітку систему керування температурою в процесі екструзії пластмас. Недоліком даної системи є те, що модель динаміки температури в пресі представляється у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з запізнюванням, а отже й розроблена система керування не враховує розподіленість властивостей матеріалу по об'єму та можливі не лінійності об'єкту. Цей факт може мати значний негативний вплив на ефективність роботи розробленої системи при її використанні на реальному об'єкті.

Діючі на сьогоднішній день системи керування процесом пресування вуглецевих виробів являють собою системи стабілізації (як правило, температури в контрольних точках) або програмного керування (швидкість пресування), причому закони зміни технологічних параметрів зазвичай визначаються емпірично.

Вагомим недоліком згаданих вище систем керування є та обставина, що вони не враховують економічних показників роботи даної технологічної стадії виробництва, що, як правило, призводить до зниження ефективності її функціонування.

У праці [16] було запропоновано техніко-економічний критерій (1), мінімізація якого в процесі керування має забезпечити мінімальну собівартість одиниці продукції при дотриманні заданих якісних показників:

$$K_{\text{опт}} = \frac{(P_e(W_{\Pi} + W_T) + P_m G_m)}{t_k v_{\Pi} F_m \rho_{\text{мат}} \left(\frac{1}{1 + \frac{I}{V_p t_k}} \right)} \rightarrow \min. \quad (1)$$

де $K_{\text{опт}}$ – змінна складова собівартості одиниці продукції, у.о/кг; V_p – значення робочого об'єму мундштука, м³; P_e – тариф на електроенергію; $W_{\text{п}}$, $W_{\text{т}}$ – витрати електроенергії; P_m , G_m – ціна та витрата сировини відповідно; t_k – тривалість процесу; $v_{\text{п}}$ – швидкість пресування; F_m – площа поперечного перерізу мундштука; $\rho_{\text{мат}}$ – густина матеріалу.

У виразі (1) I – інтегральний критерій для визначення якості випресованих заготовок, що математично описується таким чином:

$$I = \int_0^T \int_0^L \left[Q(R_{\min} - R_z)^2 + S(R_{\max} - R_z)^2 + h_1(R_{\min}) + h_2(R_{\max}) \right] dl/dt, \quad (2)$$

де T – час пресування; L – довжина мундштука; Q , S – вагові матриці; R_z – заданий радіус заготовки; R_{\min} , R_{\max} – відповідно мінімальний та максимальний радіус ядра зі структурним режимом руху; l – координата по довжині мундштука в циліндричній системі координат; t – час.

В зазначеній вище праці не було приділено увагу питанням безпосередньої побудови системи керування та аналізу її ефективності.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є синтез системи керування, яка б забезпечила покращення техніко-економічних показників процесу формування вуглецевих виробів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- побудова структури системи керування процесом формування вуглецевих виробів на основі критерію (1);
- дослідження ефективності запропонованої системи керування у порівнянні з існуючими системами методом комп'ютерного моделювання.

4. Структура системи керування з МРС-регулятором

Одним із сучасних формалізованих підходів до аналізу і синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC) [17–19].

Основною перевагою МРС-підходу, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем керування, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє управляти багатовимірними і багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, що включає нелінійність, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі і керовані змінні, враховувати невизначеності об'єктів і збурень.

Результати досліджень останніх років [20–23] свідчать про високу ефективність МРС-керування в умовах дії обмежень. Ця обставина набуває особливої ваги при синтезі системи керування процесом пресування вуглецевих виробів, де дотримання обмежень багато в чому визначає якість керування в цілому.

Виходячи з особливостей процесу формування вуглецевих виробів прогнозування поведінки об'єкту (прогнозування радіусів заготовки) на декілька кроків вперед і врахування прогнозованих змінних при розрахунку керування є доцільним. Тоді є доцільним й використання MPC-регулятора для керування даним об'єктом. До того ж MPC-регулятор обраховує керуючий сигнал на основі прогнозованих параметрів, для яких обчислюється значення критерію оптимальності. А це означає, що задавши (1) в якості такого критерію та правильно налаштувавши регулятор, отримаємо таку систему керування, що буде на кожному кроці мінімізувати (1).

Система керування процесом пресування на основі MPC-регулятора була реалізована в пакеті Matlab simulink, який містить в собі програмний засіб MPC Toolbox, що надає можливість гнучкого налаштування усіх параметрів регулятора, критерію оптимальності та технологічних обмежень.

Схема системи керування з MPC-регулятором, реалізована в simulink, представлена на рис. 2.

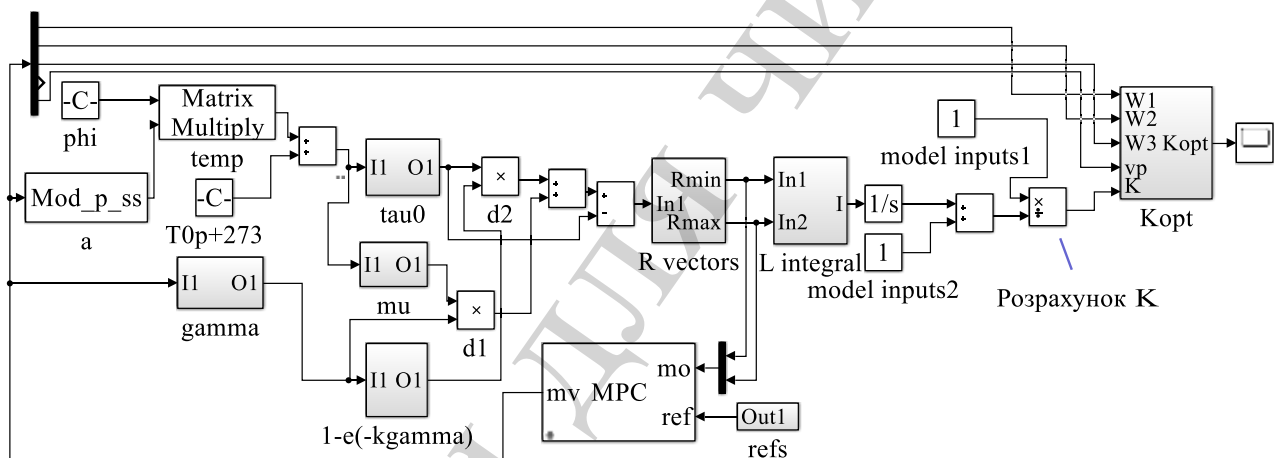


Рис. 2. Схема системи керування на основі MPC-регулятора, реалізована в *simulink*

Після реалізації системи керування в simulink було проведено її налаштування. Основними параметрами налаштування MPC-регулятора є горизонт прогнозування та горизонт керування [17], тому подальше дослідження було спрямоване на визначення їх оптимальних значень з урахуванням техніко-економічного критерію (1).

Виходячи з того, що динаміка техніко-економічного критерію (1) стає негативною (значення критерію починає збільшуватись) при значеннях 15 для горизонту прогнозування та 10 для горизонту керування, саме ці значення були вибрані як максимальні діапазони доцільних змін параметрів налаштування MPC-регулятора.

Існування точки екстремуму функції залежності техніко-економічного критерію від налаштувань МРС-регулятора можна пояснити таким чином. З одного боку, збільшення горизонту прогнозування і керування дає змогу розрахувати оптимальне (за заданим критерієм) керування на декілька кроків вперед замість того, щоб розраховувати керування на поточний крок, виходячи лише з попередніх даних, отриманих з об'єкту. З іншого боку, МРС-регулятор використовує спрощену математичну модель об'єкту і для складних нелінійних об'єктів, яким і є процес пресування, чим більше горизонт прогнозування, тим більше розбіжність між значеннями моделі та об'єкту, що призводить до погіршення якості керування. Точка екстремуму визначає той момент, коли негативний вплив від розбіжності значень моделі та об'єкту перевищує позитивний вплив від розрахунку оптимального керування.

Для визначення оптимальних налаштувань МРС-регулятора була проведена серія комп'ютерних моделювань з метою з'ясування залежності техніко-економічного критерію (1) від параметрів налаштувань регулятора. Дослідження проводилось в умовах виробництва електродів марки ЕГСП/УНР (діаметр 229 мм, довжина 1500 мм, об'ємна щільність 1.72 г/см³, питомий електроопір 6 мкОм*м) на гідравлічному пресі Д6248. Для моделювання використовувалась математична модель [22], похибка якої по відтворенню реальних даних не перевищує 2,7 %. Результати комп'ютерного моделювання представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Значення критерію оптимальності \$/кг від горизонту прогнозу (Р.Н.) та горизонту керування (С.Н.)

С.Н. Р.Н.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.394	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	0.388	0.379	—	—	—	—	—	—	—	—
3	0.368	0.367	0.366	—	—	—	—	—	—	—
4	0.367	0.364	0.364	0.363	—	—	—	—	—	—
5	0.361	0.359	0.356	0.358	0.332	—	—	—	—	—
6	0.354	0.353	0.350	0.353	0.301	0.332	—	—	—	—
7	0.349	0.338	0.329	0.338	0.284	0.314	0.328	—	—	—
8	0.346	0.310	0.311	0.324	0.262	0.305	0.310	0.315	—	—
9	0.339	0.295	0.290	0.306	0.259	0.293	0.292	0.302	0.319	—
10	0.334	0.280	0.275	0.289	0.259	0.282	0.284	0.298	0.302	0.320
11	0.342	0.270	0.258	0.279	0.262	0.274	0.280	0.285	0.297	0.306
12	0.344	0.279	0.244	0.266	0.267	0.266	0.271	0.293	0.311	0.338
13	0.349	0.285	0.230	0.251	0.274	0.265	0.284	0.302	0.325	0.359
14	0.350	0.287	0.243	0.253	0.280	0.275	0.298	0.319	0.342	0.373
15	0.352	0.291	0.245	0.254	0.288	0.291	0.311	0.341	0.368	0.389

Як впливає з наведених даних, найкращим виявилось налаштування з горизонтом прогнозування в 13 кроків та горизонтом керування в 3 кроки. За та-

ких налаштувань продуктивність збільшилась на 6 % в порівнянні з продуктивністю пресу, що працює за регламентом.

5. Дослідження ефективності системи керування процесом пресування вуглецевих виробів

Дослідження ефективності запропонованої системи керування з МРС-регулятором полягало у порівнянні якості керування даної системи з існуючою системою з ПІД-регуляторами. Динаміку зміни мінімального та максимального радіусу заготовки в вихідному перерізі з використанням налаштованого МРС-регулятора з завданням в $R=0.23$ м наведено на рис. 3.

Відомо [4, 10–13], що в системах керування формуванням вуглецевих виробів керованими змінними є температури в контрольних точках кожної зони мундштука (в цих точках встановлені термопари), а керуючими – потужність струму нагрівальників. При цьому швидкість пресування зазвичай визначається виключно технологічним регламентом.

З рис. 1 видно, що точки т. 3 та т. 5 знаходяться безпосередньо біля внутрішньої поверхні формувальної та калібрувальної зони мундштука і тому в найбільшій мірі характеризують температуру електродної маси в цих зонах. Саме тому в системі керування вони були обрані в якості контрольних точок для індуктора формувальної та калібрувальної зони відповідно.

Що ж до додаткових нагрівників, то вони вмикаються синхронно, тому для того, щоб точно забезпечити необхідні умови проковзування керування треба вести у відповідності до мінімального значення температур в т. 6–11.

Тоді система керування буде складатись з трьох контурів керування температурами. Швидкість пресування задається згідно технологічного регламенту [8]. Завдання щодо радіусу заготовки у вихідному перерізі становить $R=0.23$ м.

Схема запропонованої трьохконтурної системи керування, реалізованої в *simulink*, зображена на рис. 3.

В даній схемі, окрім моделі для розрахунку температур в контрольних точках та зворотного зв'язку з ПІД-регуляторами, для можливості порівняльного аналізу якості керування двох розглядуваних систем (МРС та ПІД) існує частина, що розраховує вектори R_{min} , R_{max} та значення критерію (1). Налаштування ПІД-регуляторів здійснювалось методом Пауела [24]. Як завдання по температурі використані значення температур в контрольних точках, отримані з експериментальних даних [8].

При проведенні імітаційного моделювання значення температур в обраних точках розраховувались за допомогою математичної моделі [25]. Результати моделювання представлені на рис. 4 (МРС-регулятор) та рис. 5 (ПІД-регулятор).

Як видно з рис. 4, 5, система керування з ПІД-регуляторами, на відміну від системи керування на основі МРС-регулятора, має перерегулювання в 8 % по R_{min} . Це означає, що в процесі розігрівання апарату (мундштука) перша система керування (МРС) буде випускати продукцію потрібної якості, починаючи з 100-ї хвилини. Друга ж система керування (ПІД) за рахунок перерегулювання почне випуск продукції такої ж якості тільки з 125-ї хвилини. В результаті значення

критерію (1) для системи з ПІД-регуляторами складає 0.25 \$/кг, що на 0.02 більше, ніж в системи з МРС-регулятором.

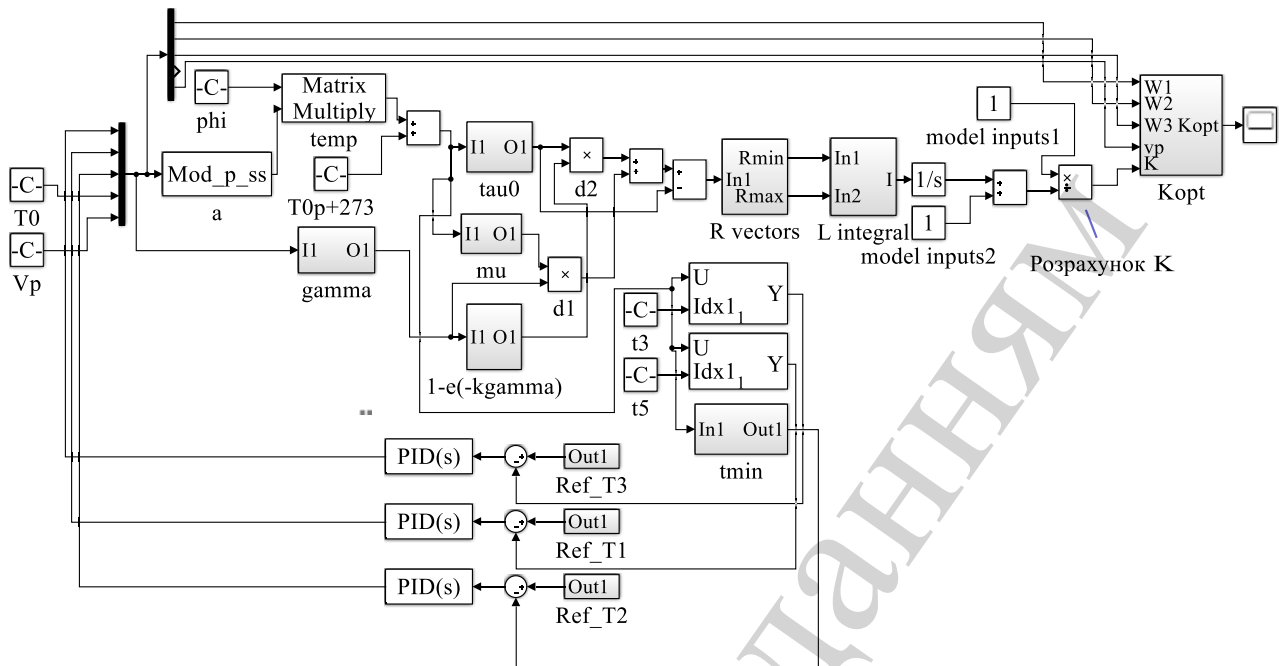


Рис. 3. Схема системи керування на основі ПІД-регуляторів, реалізована в *simulink*

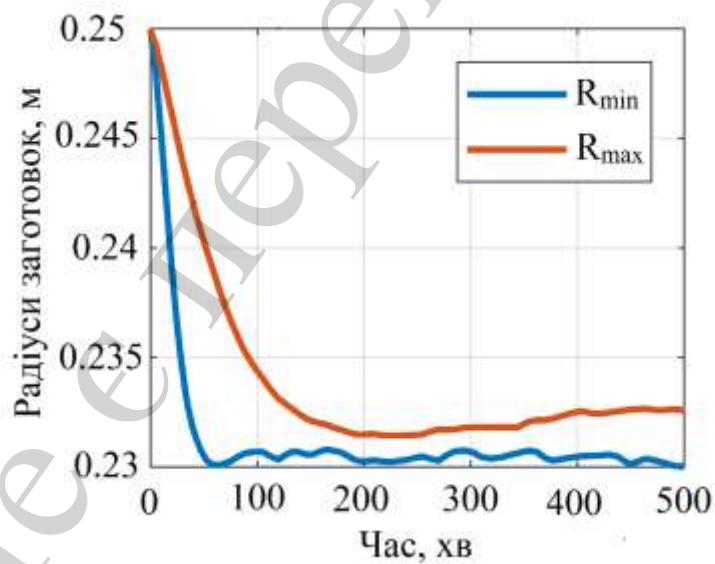


Рис. 4. Динаміка радіусу заготовки в системі з налаштованим МРС- регулятором

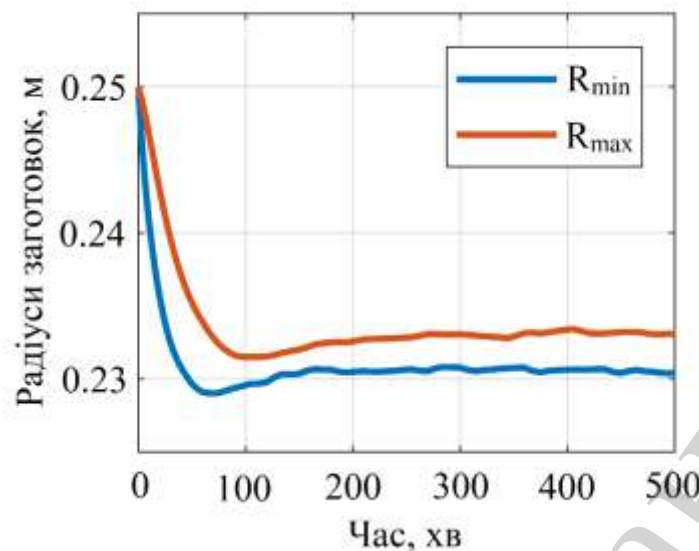


Рис. 5. Динаміка радіусу заготовки в системі з ПД-регуляторами

6. Обговорення результатів дослідження системи керування

Відомі на сьогоднішній день системи керування процесом формування вуглецевих виробів не забезпечують потрібної якості керування ним. Крім того, поза увагою залишаються економічні показники, що з урахуванням значної енергоємності процесу формування набуває особливого значення.

Запропонована система керування процесом формування вуглецевих виробів на основі МРС-регулятора розв'язує названі проблеми. Дана система в процесі керування передбачає розрахунок як критерію оптимального керування – собівартості одиниці продукції, так і інтегрального показника її якості – радіусу заготовки.

Важливу роль відіграє розроблена для реалізації в програмному пакеті Simulink структура системи керування на основі МРС-регулятору (рис. 2), що дозволяє проводити всебічне дослідження даної системи керування.

Важливим результатом проведеного дослідження є визначення екстремального характеру залежності критерія оптимальності (1) від параметрів налаштування МРС-регулятора (табл. 1), що дало можливість визначити оптимальні налаштування МРС-регулятора: горизонт прогнозування – 13 кроків, горизонт керування – 3 кроки.

Ефективність системи керування з МРС-регулятором досліджувалась у порівнянні з традиційною системою з ПД-регуляторами. Для цього розроблена та реалізована в програмному пакеті Simulink структура системи керування на основі ПД-регуляторів (рис. 3).

Результати імітаційного моделювання (рис. 4, 5) свідчать про кращу якість МРС-керування без перерегулювання, що забезпечує випуск продукції потрібної якості (розглядуваного типорозміру) на 25 хвилин раніше, ніж система з ПД-регуляторами, що в перерахунку на собівартість продукції дає економію в 0.51 \$/кг.

Дослідження ефективності запропонованої системи керування процесом формування вуглецевих виробів проводилось для гідравлічного пресу Д6248 при виробництві електродів марки ЕГСП/УНР (діаметр 229 мм, довжина 1500 мм, об'ємна щільність 1.72 г/см^3 , питомий електроопір $6 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$). Тому нема підстав говорити про універсальність розробленої системи керування. Потрібне проведення досліджень з іншими об'єктами керування в умовах виробництва різних вуглецевих виробів, що і має стати предметом подальших досліджень.

7. Висновки

1. Розроблена структура системи керування процесом формування вуглецевих виробів, побудованої на МРС-регуляторі. З метою подальшого дослідження дана структура реалізована у програмному пакеті Simulink. В результаті проведеного дослідження визначені оптимальні налаштування МРС-регулятору, а саме: горизонт прогнозування в 13 кроків та горизонт керування в 3 кроки. Розроблена система забезпечує питому собівартість одиниці продукції на рівні $5.77 \text{ \$}/\text{кг}$ при збереженні потрібної її якості. Також при використанні синтезованої системи продуктивність збільшилась на 6 % в порівнянні з продуктивністю пресу, що працює за регламентом.

2. Проведено порівняльне дослідження синтезованої системи з системою на основі ПД-регуляторів. Визначено, що для системи з ПД-регуляторами питомі собівартість одиниці продукції складає $6.28 \text{ \$}/\text{кг}$, що на 0.51 більше, ніж в системи з МРС-регулятором. Це, в свою чергу, свідчить про більш високу економічну ефективність синтезованої системи керування з МРС-регулятором

Література

1. Кузнецов, Д. М., Фокин, В. П. (2001). Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования. Новочеркасск: ЮРГТУ, 132.
2. Панов, Е. Н., Матвиенко, А. А., Карвацкий, А. Я. и др. (2011). Современное состояние проблемы получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах. Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 1 (7), 49–55.
3. Пирогов, В. И., Селезнев, А. Н. (2006). Применение антрацита как наполнителя углеродной продукции. Российский Химический Журнал, 1 (1), 12–16.
4. Karvatskii, A. Y., Lazarev, T. V. (2014). Evaluation of the Discrete Element Method for Predicting the Behavior of Granular Media Using Petroleum Coke as an Example. Chemical and Petroleum Engineering, 50 (3-4), 186–192. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9877-y>
5. Карвацкий, А. Я., Лелека, С. В., Кутузов, С. В., Дудников, П. И., Чиж, А. Н. (2008). Численное моделирование трехмерных нестационарных температурных полей в печах графитации и алюминиевых электролизерах. Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 1 (1), 46–51.
6. Панов, Є. М., Карвацький, А. Я., Кутузов, С. В. та ін. (2011). Моделювання графітування нафтового коксу в шахтній електропечі неперервної дії.

Вісник НТУУ “КПІ”. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 1 (7), 48–52.

7. Карвацкий, А. Я., Лелека, С. В., Пулинец, И. В., Лазарев, Т. В. (2011). Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 6 (5 (54)), 42–45. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2281/2085>

8. Карвацький, А. Я., Лазарєв, Т. В., Коржик, М. В. (2016). Числові дослідження кампанії формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук. Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 25, 99–106. doi: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2016.25.15>

9. Андриенко, П. Д., Ярымбаш, Д. С. (2007). Повышение энергоэффективности при автоматизированном управлении индукторами пресса. Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки), 212–213.

10. Мартынова, Д. В., Попов, В. П., Ваншин, В. В. (2017). Применение математического моделирования и системы управления процессом экструзии с целью энерго- и ресурсосбережения и обеспечения производства высококачественных экструдированных пищевых и кормовых продуктов. Интеллект. Инновации. Инвестиции, 6, 78–81.

11. Paoletti, S. (2012). Pat. No. US 9,434,099 B2. Extrusion machine with improved temperature control system. No. 14/360,278; declared: 19.11.2012; published: 22.05.2014. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/fc/c2/73/fdd749c5aae594/US9434099.pdf>

12. Markl, D., Wahl, P. R., Menezes, J. C., Koller, D. M., Kavsek, B., Francois, K. et. al. (2013). Supervisory Control System for Monitoring a Pharmaceutical Hot Melt Extrusion Process. AAPS PharmSciTech, 14 (3), 1034–1044. doi: <https://doi.org/10.1208/s12249-013-9992-7>

13. Meintanis, I., Halikias, G., Giovenco, R., Yiotis, A., Chrysagis, K. (2017). Identification and Model Predictive Control Design of a Polymer Extrusion Process. 27th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 1609–1614. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63965-3.50270-1>

14. Ravi, S., Balakrishnan, P. A. (2010). Modelling and control of an anfis temperature controller for plastic extrusion process. 2010 International conference on communication control and computing technologies. doi: <https://doi.org/10.1109/icccct.2010.5670572>

15. Ravi, S., Sudha, M., Balakrishnan, P. A. (2011). Design of Intelligent Self-Tuning GA ANFIS Temperature Controller for Plastic Extrusion System. Modelling and Simulation in Engineering, 2011, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1155/2011/101437>

16. Жученко, О. А., Хібеба, М. Г. (2017). Постановка задачі керування процесом формування у виробництві вуглецевих виробів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 47 (2), 81–88.

17. Geyer, T. (2016). Model predictive control of high power converters and industrial drives. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119010883>

18. Nikolaou, M. (2001). Model predictive controllers: A critical synthesis of theory and industrial needs. *Advances in Chemical Engineering*, 131–204. doi: [https://doi.org/10.1016/s0065-2377\(01\)26003-7](https://doi.org/10.1016/s0065-2377(01)26003-7)
19. García, M. R., Vilas, C., Santos, L. O., Alonso, A. A. (2012). A robust multi-model predictive controller for distributed parameter systems. *Journal of Process Control*, 22 (1), 60–71. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.10.008>
20. Hedengren, J. D., Shishavan, R. A., Powell, K. M., Edgar, T. F. (2014). Nonlinear modeling, estimation and predictive control in APMonitor. *Computers & Chemical Engineering*, 70, 133–148. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.04.013>
21. Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V., Scokaert, P. O. M. (2000). Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36 (6), 789–814. doi: [https://doi.org/10.1016/s0005-1098\(99\)00214-9](https://doi.org/10.1016/s0005-1098(99)00214-9)
22. Camacho, E. F., Ramirez, D. R., Limon, D., Muñoz de la Peña, D., Alamo, T. (2010). Model predictive control techniques for hybrid systems. *Annual Reviews in Control*, 34 (1), 21–31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.002>
23. Müller, M. A., Allgöwer, F. (2012). Improving performance in model predictive control: Switching cost functionals under average dwell-time. *Automatica*, 48 (2), 402–409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.11.005>
24. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. New York: Cambridge University Press, 1256.
25. Жученко, О. А., Хібеба, М. Г. (2018). Модель формування вуглецевих виробів у режимах підготовки та пресування. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, 29 (6), 149–156. URL: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_1/28.pdf